

بررسی میدان های الکتریکی و مغناطیسی خطوط انتقال نیرو و حریم های مواجه انسانی

عبدالمجید دیناروند، آرش کاتبی
 معاونت تولید نیروگاه بخار
 شرکت مدیریت تولید برق شهید رجایی
 قزوین، ایران
 dinarvand1350@yahoo.com

اصغر کشتکار
 دانشکده مهندسی برق
 دانشگاه بین المللی امام خمینی (ره)
 قزوین، ایران

خطوط انتقال نیرو بر روی بدن انسان شده و روش های متعددی برای تعدیل و کاهش این میدان ها اطراف خطوط فشار قوی ارائه شده است که پیش زمینه آن محاسبه میدان در اطراف خطوط می باشد [۱ و ۱۰]. اگر میدان های فوق مشخص نشود و یا به درستی محاسبه نشود، حریم ایمن نامناسبی را مشخص می کند. بنابراین تمهیدات حفاظتی در نظر گرفته شده برای کاهش و تعدیل اثرات نامطلوب مذکور ناکافی و در مواردی دیگر بسیار پر هزینه و غیر اقتصادی می باشد. لذا محاسبه دقیق میدان در اطراف خطوط انتقال، تمهیدات کافی و به صرفه را برای کاهش و تعدیل اثرات نامطلوب ولتاژ و جریان القایی را نتیجه خواهد داد [۳ و ۲]. برای اولین بار در جهان بطور جدی در کنگره سیگره به این موضوعات پرداخته شد.

در مراکز تولید نیرو و انتقال نیرو مانند نیروگاهها و پست های انتقال، توان تولیدی با ولتاژهای ۴۰۰ کیلو ولت تا ۲۰ کیلو ولت انتقال می یابد. بنابراین آگاهی از میدان های اطراف هادی انتقال نیرو و حریمی که در آنجا ورود توام با مدت حضور یا به عبارتی مواجهه شغلی برای پرسنل مربوط به بخش تولید نیرو و انتقال آن در این حریم مطرح می گردد، بسیار ضروری است. محققان تاکید دارند که قرار گرفتن در معرض تشعشعات امواج، اثرات نا محسوسی بر سلامتی انسان دارد و این اثرات به طول موج اشعه بستگی دارد [۵ و ۴].

توجه به این نکته حائز اهمیت است که وقتی فرکانس رادیویی به ۵۰ هرتز کاهش می یابد، هر دو میدان مغناطیسی و الکتریکی دارای مقادیر قابل توجهی هستند و هیچ یک را نمی توان در مقابل دیگری صرف نظر کرد. در این

چکیده — در این مقاله پس از مروری بر نحوه ایجاد میدان های الکتریکی و مغناطیسی و قوانین موجود در مورد حدود مواجهه شغلی و مردمی با این میدان ها، بر اساس قوانین ماکسول، روابط میدان های اطراف خطوط انتقال نوشته شده و از طریق کد برنامه متلب خطوط این میدان ها ترسیم گردیده و بر اساس اندازه میدان، حریم مواجهه شغلی و مردمی محاسبه شده است. اهمیت موضوع مورد بحث در این نکته است که شکل و اندازه ی میدان های الکتریکی را می توان ثابت در نظر گرفت ولی به دلیل تغییر بار خطوط انتقال و در نتیجه تغییر جریان آن، اندازه میدان مغناطیسی ثابت نبوده و بایستی بر حسب شکل دکل و آرایش مداری محاسبه گردد. نتیجه این محاسبه محدوده حریم مجاز شغلی و مردمی را تعیین می کند.

واژه های کلیدی — میدان مغناطیسی؛ میدان الکتریکی؛ خطوط انتقال؛ امواج؛ بهداشت شغلی؛

۱. مقدمه

عبور خطوط انتقال از مجاورت مراکز تولید نیرو و شهرها و روستاها، محاسبات میدان مغناطیسی و الکتریکی اطراف خطوط انتقال را به منظور جلوگیری از تاثیر این میدان ها بر روی انسانها ضروری می سازد. در سال های اخیر توجه زیادی به اثرات بیولوژیک میدان مغناطیسی و الکتریکی

طور دقیق محاسبه نشده ولی در مرجع شماره [۷] شکل میدان ها فقط بر اساس نوع دکل انتقال محاسبه و نمایش داده شده است. سازمان بهداشت جهانی نیز به دلیل اهمیت موضوع بصورت جداگانه به این موضوع پرداخته است. بنابراین ترسیم شکل موج میدان های اطراف خطوط انتقال ما را در نحوه اندازه گیری میدان اطراف خطوط یاری خواهد کرد.

۳.۱. اثرات میدان الکتریکی

برای روشن شدن این مطلب قبل از هر چیز باید به وضعیت فیزیکی و اندازه و شدت این میدان ها در اطراف خطوط انتقال و توزیع نیرو بپردازیم. اثر میدان الکتریکی به شکل تاثیر خارجی روی پوست است و اکثرا به صورت حرارت و سوختگی ظاهر می گردد. البته باید توجه داشت که عبور جریان ناشی از میدان الکتریکی از بدن، می تواند باعث عکس العمل به شکل شوک شود که تا حد مرگ خطر آفرین است. نتایج به دست آمده یک تحقیق در کشورهای روسیه و اسپانیا به این موضوع اشاره دارد که افرادی که در پست های فشار قوی کار می کنند ممکن است میدان شدید محل کار روی فیزیولوژی آنها اثرات نامطلوب داشته باشد و بنابراین مقرراتی برای آنها وضع شده. بدنبال اعلام این نتیجه در سال ۱۹۸۲ سیگره پس از تحقیقات وسیع که توسط گروه های متشکل از بیولوژیست ها، پزشکان و متخصصان صنعت برق انجام شده بود توانست نتیجه واحدی را در مورد اثرات میدان الکتریکی روی اندام های زنده حاصل نماید که خلاصه حد نهایی میدان الکتریکی در نواحی مختلف در جدول ۱ آمده است.

جدول ۱: حداکثر شدت میدان مجاز بر اساس توافق سیگره [۱]	
محل	شدت میدان الکتریکی (کیلو ولت بر متر)
محل های دور از دسترس افراد	۲۵
مناطق کم جمعیت	۱۵
محل عبور خطوط انتقال از روی جاده	۱۰
مناطق پر جمعیت	۱
خانه های مسکونی	۰/۵

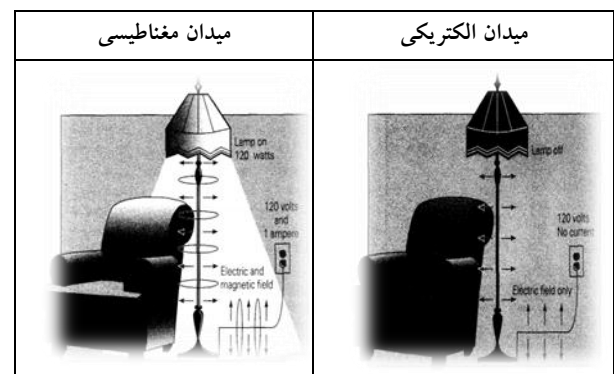
۳.۲. اثرات میدان مغناطیسی

در اثر عبور جریان از داخل هادی های خطوط انتقال و توزیع، در اطراف این هادی ها میدان مغناطیسی ایجاد می گردد. میدان مغناطیسی برعکس میدان های الکتریکی که اثر سطحی دارند، به تمام اعضای داخل بدن انسان و هر موجود زنده ای نفوذ می کنند. بنابراین اثر گذاری این میدان روی موجود زنده بیشتر از میدان الکتریکی است. تاثیر این میدان روی بدن به طور عمومی به جریان خط (هادی) و فاصله نقطه اثر گذاری میدان تا خط،

فرکانس اثرات میدان الکتریکی را با روش شیلد کردن می توان کاهش داد ولی کاهش میدان های مغناطیسی با روش های خاص مهندسی امکان پذیر است [۶]. اهمیت موضوع به قدری است که سازمان بهداشت جهانی به طور مستقل به معرفی و اثرات آن می پردازد [۱۱].

۲. میدان های الکتریکی و مغناطیسی

زمانی که در یک هادی پتانسیل به وجود آید و الکترون ها جریان ندارند اطراف هادی میدان الکتریکی و در صورت حرکت الکترون ها در هادی علاوه بر میدان الکتریکی که ناشی از پتانسیل است، میدان مغناطیسی نیز به وجود می آید. در شکل ۱ تصاویر چگونگی ایجاد دو میدان الکتریکی و مغناطیسی نمایش داده شده است.



شکل ۱: تصاویر شماتیک دو میدان الکتریکی و مغناطیسی [۲]

۳. مکانیزم تاثیر میدان ها روی بدن انسان

هنگامی که بدن انسان در معرض میدان های الکتریکی و مغناطیسی تولید شده توسط خطوط فشار قوی قرار می گیرد، این میدان ها باعث القای جریان و میدان الکتریکی در بدن می شود که در مواردی که شدت آن زیاد است، باعث تحریک در اعصاب و ماهیچه ها می شود و تاثیرات بیشماری بر روی فعالیت های فیزیولوژی بدن می گذارد. این تاثیرات با حضور جریان القایی در بدن همراه خواهد بود که مقدار جریان القایی حدود میکرو آمپر خواهد بود. ولی کم بودن این جریان دلیل کم بودن تاثیر این جریان روی بدن نمی باشد [۱]. هنوز تاثیرات بلند مدت این جریان ها شناخته شده نیست و به عنوان یک مسئله مهم تلقی می شود. حال سوال اینجاست که آیا خطوط انتقال فشار قوی و فوق فشار قوی برای پرسنل نیروگاه و همین طور عبور این خطوط از مراکز شهری می تواند اثرات سوء روی موجودات زنده داشته باشد یا نه؟ در صورتی که این میدان ها در محدوده نامجاز باشد، حریمی که از منبع ایجاد میدان بایستی رعایت گردد چقدر است؟ در ایران هنوز این حریم بر اساس بار، نوع آرایش مداری و میزان توانی که انتقال می دهند، به

قانون تنها این موسسه وظیفه تعیین، تدوین و نشر استانداردها را بر عهده دارد.

در استاندارد ۸۵۶۷ حدود پرتو گیری شغلی (پرتوگیری کارکنان به هنگام کار) برای پرتو های الکترو مغناطیسی در جدول ۳ آورده شده است. جدول ۴ حد پرتو گیری مردم که مواجهه شغلی ندارند، را نشان می دهد.

جدول ۳: حدود پرتو گیری شغلی برای پرتو های الکترو مغناطیسی [۷]

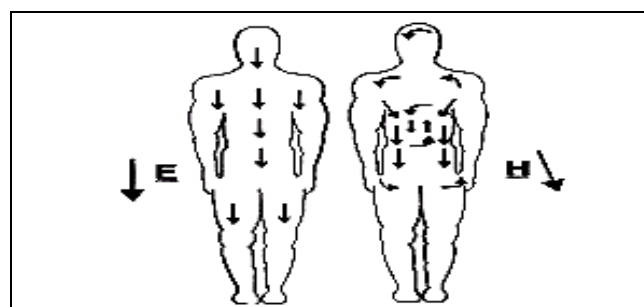
دیف	محدوده فرکانس (f)	مد شدت میدان الکتریکی $E_m \left(\frac{V}{m}\right)$	مد شدت میدان مغناطیسی $H_m \left(\frac{A}{m}\right)$	مد پتانسیل شار مغناطیسی $B(\mu T)$	مد پتانسیل توان موع $S_{eq} \left(\frac{W}{m^2}\right)$
۱	>۱-1 (Hz)	-	-	$1/173 \times 10^4$	-
۲	۱-۸ (Hz)	۲۰۰۰۰	$1/173 \times 10^4 + f^2$	$2 \times 10^4 + f^2$	-
۳	۸-۲۵ (Hz)	۲۰۰۰۰	$2 \times 10^4 + f$	$2/5 \times 10^4 + f$	-
۴	۰/۰۲۵-۰/۸۲ (kHz)	۵۰۰ + f	۲۰ + f	۲۵ + f	-
۵	۰/۸۲-۶۵ (kHz)	۶۱۰	۲۴/۴	۳۰/۷	-
۶	۰/۰۶۵-۱ (MHz)	۶۱۰	$1/16 + f$	۲ + f	-
۷	۱-۱۰ (MHz)	$610 + f$	$1/16 + f$	۲ + f	-
۸	۱۰-۴۰۰ (MHz)	۶۱	۰/۱۶	۰/۲	۱۰
۹	۴۰۰-۲۰۰۰ (MHz)	$3\sqrt{f}$	$0.108\sqrt{f}$	$0.1\sqrt{f}$	$f \times 40$
۱۰	۲-۳۰۰ (GHz)	۱۳۷	۰/۳۶	۰/۴۵	۵۰

وابسته است. به طور عمومی به ازاء افزایش هر ۱۰۰۰ آمپر ۱۰۰ میکرو تسلا شدت میدان مغناطیسی افزایش می یابد. البته باید توجه داشت که پیدایش میدان های مغناطیسی در فرکانس های پایین تنها محدود به خطوط انتقال و ناحیه زیر این خطوط نیست ، بلکه هر جایی که شدت جریان الکتریکی بالا وجود دارد باید منتظر وجود چنین میدانی باشیم. در جدول ۲ حداکثر شدت میدان مغناطیسی در اطراف خطوط ارائه شده است.

جدول ۲: حداکثر شدت میدان مغناطیسی در اطراف خطوط [۱]

محل	شدت میدان مغناطیسی (میکرو تسلا)
خطوط هوایی فشار قوی	۴۰
در پست های انتقال	۵۰
ترانسفور ماتورها با جریان بالا	۱۰۰
کلید جریان مستقیم	۱۰۰
دژنکتور در محوطه باز	۱۵۰۰

در شکل ۲ تصاویر تاثیر دو میدان مغناطیسی و الکتریکی روی بدن انسان آورده شده است. همان طور که ذکر شد میدان مغناطیسی حلقه های کوچکی (مسیر بسته) را در بدن ایجاد می کند ولی میدان الکتریکی از خارجی ترین لایه سطحی بدن می گذرد.



شکل ۲: تاثیر دو میدان الکتریکی و مغناطیسی روی بدن [۴]

۴. استانداردهای مواجهه با میدان

طبق تعریف ، زمان مواجهه با میدان مدت زمانی است که یک فرد در مجاورت میدان بیش از حد مجاز قرار می گیرد. برای تشخیص حدود مواجهه با میدان های مغناطیسی و الکتریکی در طول یک روز قوانین و الزاماتی وجود دارد که سه سازمان زیر در ایران قوانین لازم الاجرا وضع می نمایند. این سازمان ها عبارتند از:

اداره تعاون کار و رفاه اجتماعی، مرکز بهداشت (کار) شهرستان [۱۲] و موسسه استاندارد و تحقیقات صنعتی ایران که این موسسه در خصوص امواج و تاثیر مواجهه با آن استاندارد شماره ۸۵۶۷ منتشر نموده است. به موجب

جدول ۴: حدود پرتو گیری مردم ، برای پرتو های الکترو مغناطیسی [۷]

دیف	محدوده فرکانس (f)	مد شدت میدان الکتریکی $E_m \left(\frac{V}{m}\right)$	مد شدت میدان مغناطیسی $H_m \left(\frac{A}{m}\right)$	مد پتانسیل شار مغناطیسی $B(\mu T)$	مد پتانسیل توان موع $S_{eq} \left(\frac{W}{m^2}\right)$
۱	>۱-1 (Hz)	-	-	$4/10 \times 10^4$	-
۲	۱-۸ (Hz)	۱۰۰۰۰	$2/25 \times 10^4 + f^2$	$4 \times 10^4 + f^2$	-
۳	۸-۲۵ (Hz)	۱۰۰۰۰	$4000 + f$	$5000 + f$	-
۴	۰/۰۲۵-۰/۸ (kHz)	۲۵۰ + f	۴ + f	۵ + f	-
۵	۰/۸-۳ (kHz)	۲۵۰ + f	۵	۷/۲۵	-
۶	۳-۱۵۰ (kHz)	۸۷	۵	۷/۲۵	-
۷	۰/۱۵-۱ (MHz)	۸۷	$0.83 + f$	$0.82 + f$	-
۸	۱-۱۰ (MHz)	$87 + \sqrt{f}$	$0.83 + f$	$0.82 + f$	-
۹	۱۰-۴۰۰ (MHz)	۲۸	۰/۰۳۳	۰/۰۹۲	۲
۱۰	۴۰۰-۲۰۰۰ (MHz)	$1/173 \times \sqrt{f}$	$0.037\sqrt{f}$	$0.1046\sqrt{f}$	$f \times 200$
۱۱	۲-۳۰۰ (GHz)	۶۱	۰/۱۶	۰/۲	۱۰

۵. مدل سازی دکل انتقال توان

از این بخش به بعد به معرفی سیستم انتقال توان از نیروگاه ها تا خطوط انتقال پرداخته می شود. دکل ها تجهیزات نگه دارنده خطوط انتقال نیرو بین دو نقطه جغرافیایی هستند و بسته به توان انتقال دارای اشکال متفاوت و دارای استاندارد ساخت متناسب با نوع توانی که انتقال می دهند هستند. به

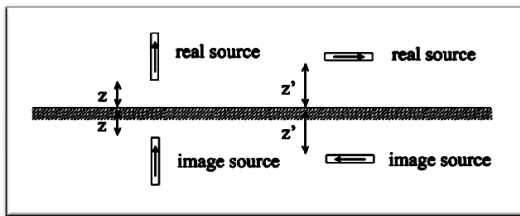
برای محاسبه میدان در اطراف هادی که در امتداد یک محور قرار دارد می توان از رابطه ۸ استفاده کرد:

$$H = \frac{i\hat{a}_\phi}{4\pi|r-r'|} \quad (8)$$

با توجه به تقارن استوانه ای می توان بردار یکه \hat{a}_ϕ در مختصات استوانه ای را در مختصات صفحه ای به دو مولفه در جهات \hat{a}_x و \hat{a}_y تجزیه نمود و میدان را در مختصات صفحه ای به دست آورد.

$$\hat{a}_\phi = -\sin\phi \times \hat{a}_x + \cos\phi \times \hat{a}_y \quad (9)$$

با توجه به اینکه دکل ها در هر مدار سه هادی حامل جریان دارند که نسبت به یکدیگر ۱۲۰ درجه دارای اختلاف فاز هستند لذا برای محاسبات چند هادی حامل جریان، ابتدا میدان آنها را در جهات \hat{a}_x و \hat{a}_y تجزیه و با استفاده از قضیه جمع آثار میدان مجموع در هر جهت را در صفحه مختصات به دست می آوریم. در عمل برای یک هادی طویل که حامل جریان است از طریق قانون دست راست، می توان برای تعیین جهت میدان مغناطیسی استفاده کرد. قرارداد جهت جریان مثبت به سمت بیرون از صفحه بوده و میدان در ارتفاع دو متری از سطح زمین که تراز قد یک انسان است، محاسبه می گردد. در مسائل الکترومغناطیس حضور زمین در فضای میدان ها بسیار حائز اهمیت است. حضور زمین در کنار یک هادی باعث تغییر شکل میدان ها می گردد .



شکل ۴: قضیه تصاویر

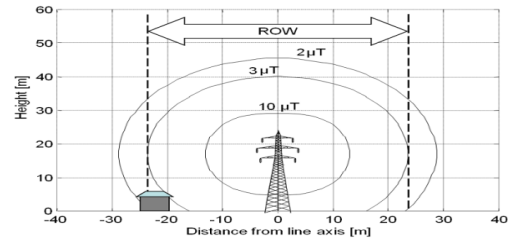
قضیه تصاویر (Image Theorem) مدل سازی حضور زمین را در کنار هادی نشان می دهد. در این قضیه جهت جریان مدل سازی می گردد و زمین حذف می شود. این مدل سازی در شکل ۴ نشان داده شده است.

۷. محاسبه میدان

با توجه به مباحث گفته شده، معادلات حاکم بر هادی ها را نوشته و جهت محاسبه میدان به روش زیر عمل می کنیم.

در این روش مختصات منبع(هادی) با بردار r' نامیده می شود و عبارتست از:

عبارتی شکل و سایز دکل های انتقال، متناسب با ولتاژ انتقال کاملاً تعریف شده است. در شکل ۳ نمونه ای از شکل یک دکل و میدان مغناطیسی اطراف آن آورده شده است.



شکل ۳: نمونه ای از شکل یک دکل و میدان مغناطیسی اطراف آن [۸]

در مراکز انتقال نیرو بسته به نوع و تعداد مدارات توزیع توان، انواع مختلف دکل انتقال نیرو وجود دارد. میدان های اطراف این دکل ها را نیز با کمک قضیه جمع آثار (Super position theorem) می توان به دست می آید. این استانداردها در کشورهای مختلف متفاوت بوده و زمانی که خطوط اصلی انتقال انشعاب دار می شود، شکل دکل های منشعب نیز متفاوت است. فاصله دو دکل از یکدیگر نیز استاندارد خاص خود را داراست و وابسته به شرایط جغرافیایی حاکم دارد. اگر در دکل ها یک مدار سه فاز را انتقال دهند به آنها یک مداره گفته می شود و یک دکل به صورت معمول تا سه مدار را می تواند انتقال دهد. در ادامه به روابط میدان های الکتریکی و مغناطیسی و قضایای مربوطه جهت محاسبات این مدارات اشاره می گردد.

۶. محاسبه چگالی شار مغناطیسی

پتانسیل ایجاد شده در ژنراتورهای نیروگاه دارای ولتاژ سه فاز سینوسی بوده و با دامنه ثابت ۱۲۰ درجه با همدیگر اختلاف فاز دارند. با توجه به هارمونیک بودن جریان، جهت محاسبات میدان می توان از معادلات ماکسول با شکل زیر استفاده کرد [۹].

$$\Delta \times E = -J\omega B \quad (1)$$

$$\Delta \times H = J\omega D + J \quad (2)$$

$$\Delta \times D = \rho \quad (3)$$

$$\Delta \times B = 0 \quad (4)$$

برای حل معادلات فوق می توان از معادلات کمکی ۵ الی ۷ نیز استفاده کرد:

$$D = \epsilon \times E \quad (5)$$

$$B = \mu \times H \quad (6)$$

$$J = \sigma E + J_0 \quad (7)$$

جداگانه مورد بررسی قرار می گیرد و سپس چگالی شار مغناطیسی کلی با استفاده از قضیه جمع آثار به دست می آید. در بخش سوم که بخش خروجی های برنامه است می توان نمودار های مختلفی را بر حسب نیاز رسم کرد. که در این مقاله نمودارهای زیر استخراج شده است:

- شکل میدان در ارتفاع دو متری (متناسب با استاندارد قد انسان)
 - تاثیر ارتفاع در شکل میدان و اندازه آن
 - شکل و اندازه ی سه بعدی میدان از سطح زمین تا زیر دکل
 - تاثیر تغییر آرایش فازی مدارهای دکل روی شکل و اندازه ی میدان
- با استفاده از نرم افزار فوق که به صورت m.file در نرم افزار متلب اجرا می شود، میدان الکتریکی و مغناطیسی هر نوع دکل با انواع ظرفیت انتقال به دست آورده شده است. توسط این نرم افزار به راحتی شکل میدان الکتریکی و مغناطیسی هر هادی حامل جریان در مجاورت زمین را به دست آورد و حریم مواجهه آن را نیز تعیین نمود. اعتبار اشکال به دست آمده در مرجع [۱۴] آورده شده است.

در الگوریتمی که کد برنامه بر اساس آن نوشته شده است ورودیها شامل ابعاد فضای حالت، ارتفاع بازو ها، فاصله بازو ها از مرکز دکل، ولتاژ و جریان خط و آرایش فازی می باشد، محاسبات برنامه شامل محاسبه میدان در فضای حالت و خروجی های برنامه عبارتند از ترسیم اندازه میدان در ارتفاع های مختلف (دو بعدی و سه بعدی) و محاسبه حدود مجاز شغلی و مردمی مواجهه با میدان.

۱.۱ کاهش تاثیر میدان دکل با تغییر آرایش فازی

با توجه به اینکه در دکل های دو مداره مجموعه مدار سه فاز دوم را با فرض ثابت بودن مدار سه فاز اول، می توان به ۶ حالت مختلف آرایش کرد، لذا با برنامه فوق می توان بهترین حالت آرایشی این دو مدار نسبت به همدیگر را برای کاهش چگالی شار مغناطیسی به دست آورد. در جدول ۵ و ۶ کمترین و بیشترین میدان حاصل از تغییر آرایش مداری فازها نشان داده شده است که U و V و W به ترتیب فازهای مدارات هستند.

۱.۲ انواع دکل های انتقال ۴۰۰ کیلوولت

در سیستم انتقال قدرت دکل های انتقال دارای استاندارد ها و اشکال خاصی هستند و هر یک کدهای اختصاص یافته به خود را دارند. برای هر دکل چگالی شار مغناطیسی به ازاء عبور ۵۰۰ آمپر نمایش داده شده است. هر یک از این دکل ها به لحاظ شکل هندسی و تعداد مداراتی را که در بر دارند، دارای شدت میدان های متفاوتی در ارتفاع دو متری سطح زمین هستند. با

$$X_{r'} = \left(\frac{D}{2}\right) - L_1 \quad (10)$$

$$Y_{r'} = h \quad (11)$$

مختصات محل اثر میدان با عنوان نقطه r' نامیده می شود و عبارتست از:

$$X_r = x_i \quad (12)$$

$$Y_r = y_i \quad (13)$$

در معادلات فوق D طول فضای حالت و h ارتفاع بازو و L_1 طول بازوهای دکل است. در ادامه خواهیم داشت:

$$H = \frac{\mu i \hat{a}_\varphi}{4\pi|r-r'|} \quad (14)$$

با جایگزینی بردار \hat{a}_φ خواهیم داشت:

$$\vec{H} = \frac{\mu i(-\sin \varphi \times \hat{a}_x + \cos \varphi \times \hat{a}_y)}{4\pi|r-r'|} \quad (15)$$

$$|r-r'| = \sqrt{((D/2) - L_1 - x_i)^2 + (y_i - h)^2} \quad (16)$$

$$\cos \varphi = \frac{y_i - h}{\sqrt{((D/2) - L_1 - x_i)^2 + (y_i - h)^2}} \quad (17)$$

$$\sin \varphi = \frac{x_i - ((D/2) - L_1)}{\sqrt{((D/2) - L_1 - x_i)^2 + (y_i - h)^2}} \quad (18)$$

$$\vec{H}_{-v} = \frac{\mu i(y_i - h)\hat{a}_x}{4\pi((D/2) - L_1 - x_i)^2 + (y_i - h)^2} \quad (19)$$

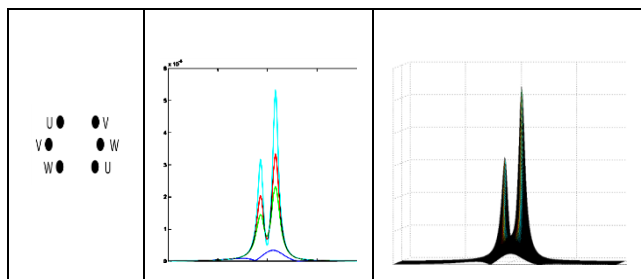
$$\vec{H}_{-h} = \frac{\mu i(x_i - ((D/2) - L_1))\hat{a}_y}{4\pi((D/2) - L_1 - x_i)^2 + (y_i - h)^2} \quad (20)$$

$$\vec{H} = \vec{H}_{-v} + \vec{H}_{-h} \quad (21)$$

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad (22)$$

۸. مدلسازی نرم افزاری و نتایج

جهت محاسبات میدان، روابط فوق در محیط نرم افزار متلب (MATLAB) پیاده سازی شده است. در این کد برنامه، در بخش ورودی ساختمان هندسی دکل [۱۳] و جریان ورودی هر مدار را طرح ریزی می نماید و در بخش دوم با استفاده از روابط و قضایایی که در بالا ذکر شد چگالی شار مغناطیسی محاسبه می گردد. در این برنامه چگالی شار مغناطیسی هر هادی



۹. میدان های الکتریکی

پتانسیل ایجاد شده در ژنراتورهای نیروگاه دارای ولتاژ سه فاز سینوسی بوده و ولتاژ موثر ۴۰۰ کیلوولت دارد می توان از قوانین هادی استوانه ای جهت محاسبه ی میدان الکتریکی استفاده کرد. بر این اساس سطح گوسی گرفته شده در شکل ۵ و شاری که از آن خارج می گردد، می توان روابط زیر را نوشت [۹]:

$$Q = L \times \lambda \quad (23)$$

$$Q = D \times S_{\text{Gaussian}} \quad (24)$$

$$E = \frac{\lambda}{2\pi\epsilon_0 r} \quad (25)$$

$$k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \quad (26)$$

$$v = -\int_{r_0}^r e \cdot dl \quad (27)$$

$$v = -2k\lambda \int_{r_0}^r \frac{1}{r} dr \quad (28)$$

$$v = -2k\lambda \ln\left(\frac{r}{r_0}\right), r \neq 0, \infty \quad (29)$$

جهت میدان الکتریکی یک سیم راست هم راستا با محور \hat{a}_z ، در جهت \hat{a}_r بوده و برای محاسبه باید بردار یکه \hat{a}_r را در مختصات دکارتی با استفاده از رابطه (۳۱) تجزیه کرد (زاویه بین محور \hat{a}_x و \hat{a}_y می باشد).

$$\hat{a}_r = (\sin \alpha)\hat{a}_x + (\cos \alpha)\hat{a}_y \quad (31)$$

برای محاسبات چند هادی دارای پتانسیل، ابتدا میدان الکتریکی آنها را در جهات \hat{a}_x و \hat{a}_y تجزیه و با استفاده از قضیه جمع آثار میدان مجموع در هر

استفاده از کد برنامه فوق انواع آرایش مداری به این دکل ها اعمال گردیده و همانطور که ذکر شد نتایج آن در جدول ۵ و ۶ آورده شده است.

۸.۳. محاسبه مرز شار مغناطیسی حریم انسانی

با توجه به مطالبی که در بخش قوانین موجود در ایران ذکر شد، سه محدودیت برای شار مغناطیسی وجود دارد که عبارتند از:

حداکثر چگالی شار برای مواجهه شعلی در فرکانس ۵۰ هرتز ۰/۵ میکروتسلا و حداکثر چگالی شار برای مواجهه مردمی در فرکانس ۵۰ هرتز ۰/۱ میکروتسلا و بر اساس قانون کار، هرگز نباید بدن انسان با میدان ۶ میکروتسلا برخورد داشته باشد.

بر این اساس حدود فوق در برنامه متلب نشان گذاری گردید و حدود فاصله نامجاز از مرکز دکل به دست آمد (شکل ضمیمه ۲). در تمامی دکل ها به جز 5111 جریان ۵۰۰ آمپر (به عنوان جریان پیش فرض میدان مغناطیسی) در نظر گرفته شده است.

جدول ۵: نمایش آرایش باندها کمترین میدان		
نمایش آرایش هادی های دکل	شکل و اندازه میدان مغناطیسی در چند ارتفاع مختلف	شکل سه بعدی اندازه میدان مغناطیسی از زمین تا نزدیکی هادی های دکل

جدول ۶: نمایش آرایش باندها بیشترین میدان		
نمایش آرایش هادی های دکل	شکل و اندازه میدان مغناطیسی در چند ارتفاع مختلف	شکل سه بعدی اندازه میدان مغناطیسی از زمین تا نزدیکی هادی های دکل

$$\vec{E} = \frac{v((\sin \alpha)\hat{a}_x + (\cos \alpha)\hat{a}_y)}{rLn(\frac{b}{a})} \quad (38)$$

$$|r - r'| = \sqrt{((D/2) - L_1 - x_i)^2 + (y_i - h)^2} \quad (39)$$

$$\vec{E}_{-v} = \frac{v(y_i - h)\hat{a}_y}{((D/2) - L_1 - x_i)^2 + (y_i - h)^2 Ln(\frac{b}{a})} \quad (40)$$

$$\vec{E}_{-h} = \frac{v(x_i - ((D/2) - L_1))\hat{a}_x}{((D/2) - L_1 - x_i)^2 + (y_i - h)^2 Ln(\frac{b}{a})} \quad (41)$$

$$\vec{E} = \vec{E}_{-v} + \vec{E}_{-h} \quad (42)$$

روابط فوق که در یک کد برنامه متلب طرح ریزی گردیده است، جهت محاسبات میدان با استفاده از روابط فوق و در محیط نرم افزار متلب انجام شده است. در کد برنامه، در بخش ورودی فضای هندسی دکل را طرح ریزی می نماید و در بخش دوم با استفاده از روابط که در بالا ذکر شد میدان الکتریکی محاسبه می گردد. در این کد برنامه میدان الکتریکی هر هادی جداگانه مورد بررسی قرار می گیرد و سپس میدان الکتریکی کلی به دست می آید. در بخش سوم نیز میدان الکتریکی ها در ارتفاع دو متری که بر حسب قد یک انسان در نظر گرفته شده است، نمایش داده می شود و تاثیر ارتفاع نیز نمایش داده می شود.

۱.۱ شکل و اندازه میدان الکتریکی انواع دکل-ها

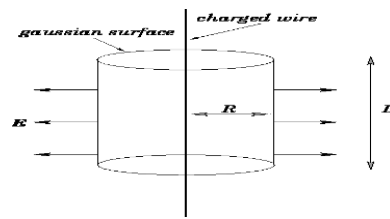
همانطور که در بخش های قبلی ذکر شد دکل های ۴۰۰ کیلو ولت دارای ساختار هندسی متفاوتی هستند. با توجه به ساختار فیزیکی هر دکل کد برنامه اجرا گردید و نتایج زیر بدست آمد که این نتایج عبارتند از:

- شکل سه بعدی میدان الکتریکی
- اندازه میدان الکتریکی در ارتفاع دو متری
- میزان حریم مواجهه شغلی و مردمی برای هر دکل

لازم به یاد آوری است، همان طور که در بالا اشاره شد حدود مواجهه شغلی در نیروگاه بر اساس استاندارد باید به گونه زیر در نظر گرفته شود:

- میانگین چگالی شار مغناطیسی در ۸ ساعت کار باید کمتر از ۰/۲ تسلا باشد.
- حداکثر چگالی شار مغناطیسی کمتر از ۲ تسلا باشد.

جهت را در صفحه مختصات به دست می آوریم و میدان را در ارتفاع دو متری از سطح زمین که تراز قد یک انسان است، محاسبه می کنیم.



شکل ۵: سطح گوسی سیم راست

۱.۰ محاسبه میدان الکتریکی

جهت محاسبه میدان الکتریکی با توجه به شکل ۵ به روش زیر عمل می کنیم.

در این روش مختصات هادی با عنوان نقطه r' نامیده می شود و عبارتست از:

$$X_{r'} = \left(\frac{D}{2}\right) - L_1 \quad (32)$$

$$Y_{r'} = h \quad (33)$$

مختصات محل اثر میدان با عنوان نقطه r نامیده می شود و عبارتست از:

$$X_r = x_i \quad (34)$$

$$Y_r = y_i \quad (35)$$

در معادلات فوق، D طول فضای حالت و L_1 ارتفاع بازو و h طول اولین بازوی دکل است. با توجه به اینکه در دکل ها ولتاژ انتقال مشخص می باشد، از روابط (۳۶) الی (۴۲) جهت محاسبات میدان الکتریکی استفاده می کنیم:

$$v = -2k\lambda Ln(\frac{b}{a}) \quad (36)$$

$$\vec{E} = \frac{v}{rLn(\frac{b}{a})} \hat{a}_r \quad (37)$$

با جایگزینی بردار \hat{a}_r از رابطه (۳۷) خواهیم داشت:

[6] Dezelak, K., G. Stumberger, et al. (2010). "Arrangements of overhead power line conductors related to the electromagnetic field limits". Modern Electric Power Systems (MEPS), 2010 Proceedings of the International Symposium, IEEE.

[۷] موسسه تحقیقات صنعتی ایران، "پرتوهای غیر یون ساز-حدود پرتوگیری"، استاندارد ملی ایران شماره ۸۵۶۷، چاپ اول، ۱۳۸۵.

[8] Moro, F. and R. Turri (2012). "ACCURATE CALCULATION OF THE RIGHT-OF-WAY WIDTH FOR POWER LINE MAGNETIC FIELD IMPACT ASSESSMENT." Progress In Electromagnetics Research B 37.

[9] Cheng, D. K. (1989). "Field and wave electromagnetics", Addison-Wesley New York.

[10] Razavipour, S., M. Jahangiri, et al. "Electrical Field around the overhead Transmission Lines."

[11] Electromagnetic fields, <http://www.who.int/>

[۱۲] وزارت بهداشت و درمان و آموزش پزشکی-معاونت سلامت - مرکز سلامت محیط کار، "حدود تماس شغلی بیماری زا"، شماره دوره یا مجله، ۳۳۲-۳۳۴، ۱۳۸۱.

[13] LaForest, J. (1981). "Transmission-line reference book". 345 kV and above, General Electric Co., Pittsfield, MA (USA). Large Transformer Div.; General Electric Co., Schenectady, NY (USA). Electric Utility Systems Engineering Dept.

[14] "Calculated Electric and Magnetic Field, Audible Noise Levels, and Radio Noise Levels, Appendix I", US BUREAU OF LAND MANAGEMENT, <http://www.blm.gov/>.

جدول ۷: علائم

پارامتر	معادل	پارامتر	معادل
E	میدان الکتریکی	ρ	چگالی حجمی بار
D	چگالی جابجایی	δ	رسانایی
B	شار مغناطیسی	μ	ضریب نفوذ پذیری
H	میدان مغناطیسی	ϵ	ضریب دی الکتریک
J	چگالی جریان	j_0	چگالی منبع بار
r	فاصله مبدا مختصات تا نقطه محاسبه میدان	\hat{a}_r	برداری یکه نقطه بار تا نقطه محاسبه میدان
r'	فاصله مبدا مختصات تا نقطه جریان		

- اگر فقط دست و پاها در معرض پرتوگیری باشد و بدن پرتوگیری نکند و چگالی شار مغناطیسی باید کمتر از ۵ تسلا باشد.

۱۲. نتیجه گیری

برای بررسی های میدان های الکتریکی و مغناطیسی در سایت نیروگاه ها و مراکز انتقال و همچنین در شهر ها و روستاهایی که در معرض این میدان ها هستند، ابتدا باید تصور کاملی از شکل این میدان ها و همبندطور جهت حداکثر تغییرات میدانی را باید بدانیم تا بتوانیم مسیر صحیحی را برای اندازه گیری معین کنیم. همانطور که ملاحظه شد ولتاژ خطوط مقدار معینی دارد و بنابراین میدان های الکتریکی وابسته به توان خط نیست. ولی جریان هر خط بسته به مقدار توانی که انتقال می دهد متفاوت است بنابراین پیشنهاد می گردد تا این خطوط در حداکثر توان انتقالی مورد اندازه گیری میدان مغناطیسی قرار گیرد. اندازه گیری هایی که انجام می شود بیشتر به مسیر تردد افراد می پردازد تا اینکه بتواند نقشه میدانی ناحیه را ایجاد نماید.

پس از اندازه گیری میدان ها بر اساس نقشه مسیری که برنامه فوق در اختیار می گذارد می توان ناحیه های نامجاز را با خط کشی های تعریف شده، معین علائم هشدار دهنده نصب نماییم. برای مراکز شهری نیز دکل ها را با ارتفاع بالاتر انتخاب کرده تا محدوددهی ناحیه نامجاز را کاهش دهیم. از طرفی با انتخاب آرایش مداری دکل ها این میدان ها را به حداقل برسانیم. با داشتن میدان زیر یک دکل می توان به مطالعات موردی روی تاثیر دراز مدت این میدان روی خون و اعضاء بدن و ... پرداخت. و مهمترین نتیجه ای که از این برنامه می توان بدست آورد حدود نامجاز شغلی و مردمی بر اساس محاسبه (و نه الگوبرداری) است که از این طریق می توان قوانین متحدالشکلی برای جلوگیری از آسیب های انسانی جاری ساخت.

منابع

- [۱] فریدونی ع، وحیدی ب، "تحلیل اثرات میدان الکترومغناطیس فرکانس بسیار پایین خطوط برق فشار قوی بر روی بدن انسان در فضای آزاد و پست های فشار قوی"، چهارمین کنفرانس نیروگاه های برق کشور، تهران، ۱۳۹۰.
- [2] Cherry, N. J. (2001). "Evidence that electromagnetic fields from high voltage powerlines and in buildings, are hazardous to human health, especially to young children."
- [3] Zemljarić, B. (2011). "Calculation of the Connected Magnetic and Electric Fields Around an Overhead-Line Tower for an Estimation of Their Influence on Maintenance Personnel." Power Delivery, IEEE Transactions on 26(1): 467-474.
- [4] Hossam-Eldin, A., W. Mokhtar, et al. (2012). "Effect of Electromagnetic Fields from Power Lines on Metallic Objects and Human Bodies." International Journal of Electromagnetics and Applications 2(6): 151-158.
- [5] Gouda, O. E., G. M. Amer, et al. (2009). "Computational Aspects of Electromagnetic Fields near HV Transmission Lines." Energy & Power Engineering 1(2).